

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-91095

(P2000-91095A)

(43) 公開日 平成12年3月31日 (2000.3.31)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テームコード (参考)
H 0 5 G 2/00		H 0 5 G 1/00	K 4 C 0 9 2
G 2 1 K 5/02		C 2 1 K 5/02	X
H 0 5 H 1/24		H 0 5 H 1/24	

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願平10-259055

(22) 出願日 平成10年9月14日 (1998.9.14)

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72) 発明者 近藤 洋行

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(72) 発明者 神高 典明

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(74) 代理人 100094846

弁理士 細江 利昭

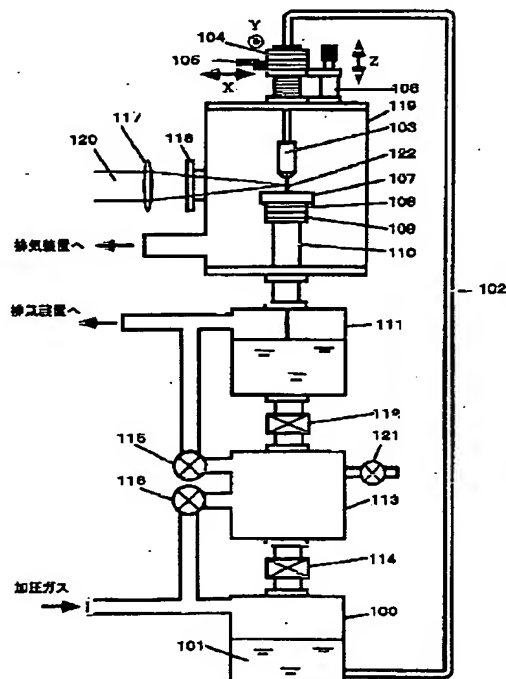
Fターム (参考) 4C092 AA06 AA15 AB21 AC08 AC09

(54) 【発明の名称】 X線発生装置

(57) 【要約】

【課題】 強度のX線を長期間に亘って発生させても、ターゲットからの飛散粒子によりX線光学素子の破損や劣化が発生しないLPXを提供する。

【解決手段】 液化標的溜まり100中の標的材料101は、配管102を通り、フィードスルーを通過した後、ノズル103より噴出する。ノズル103から噴出されてできた標的材料の液柱122にレーザー光を照射しプラズマを生成してX線を発生させる。標的材料は可変アパーチャー107及びパイプ110を通過した後、容器111内に蓄積される。その後、各バルブを使用した均圧操作を経て、容器113を介して再び液化標的溜まり100に戻されて循環使用される。ノズル103から噴出される標的材料は、連続的に噴出されるようにしてもよいし、間欠的に噴出されるようにしてもよい。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 真空中に排気された容器の中に置かれた標的材料にレーザー光を照射することにより、当該標的材料をプラズマ化し、当該プラズマよりX線を発生させるX線発生装置であって、前記標的材料の形態が液状であり、吐出口より連続的又は間欠的に吐出されることを特徴とするX線発生装置。

【請求項2】 真空中に排気された容器の中に置かれた標的材料にレーザー光を照射することにより、当該標的材料をプラズマ化し、当該プラズマよりX線を発生させるX線発生装置であって、前記標的材料の形態が粉末状であり、この粉末状の標的材料が溶液中に拡散され、当該混濁液が吐出口より連続的又は間欠的に吐出されることを特徴とするX線発生装置。

【請求項3】 請求項1又は請求項2に記載のX線発生装置であって、前記標的材料又は前記混濁液の噴出速度が少なくとも50m/sec以上であることを特徴とするX線発生装置。

【請求項4】 請求項1から請求項3のうちいずれか1項に記載のX線発生装置であって、前記液状標的又は前記混濁液が、溶解された液相の金属であることを特徴とするX線発生装置。

【請求項5】 請求項4に記載のX線発生装置であって、前記熔融された液相の金属が、錫(Sn)あるいは錫(Sn)を含む材料であることを特徴とするX線発生装置。

【請求項6】 請求項1から請求項3のうちいずれか1項に記載のX線発生装置であって、前記液状標的又は前記混濁液が、冷却された液化ガスであることを特徴とするX線発生装置。

【請求項7】 請求項6に記載のX線発生装置であって、前記冷却された液化ガスが、希ガス又は希ガスを含有するガスを特徴とするX線発生装置。

【請求項8】 請求項1から請求項7のうちいずれか1項に記載のX線発生装置であって、標的材料として使用される液相の物質又は前記混濁液を循環使用するための循環機構を具備したことを特徴とするX線発生装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、X線顕微鏡、X線分析装置、X線露光装置などの、X線機器に使用されるX線源として用いるのに好適なX線発生装置に関するものであり、さらに詳しくは、レーザー光を標的材料上に照射することにより、当該標的材料をプラズマ化し、当該プラズマよりX線を発生させるX線発生装置（以下では、レーザープラズマX線源、LPXと呼ぶ）に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】LPXは高輝度でありながら小型であることから、実験室サイズのX線装置（例えば、X線顕微

鏡やX線分析装置など）用の光源として注目されている。また、近年ではX線縮小露光装置用の光源としても注目されている。

【0003】しかしながら、LPXを実用化するにあたっては、プラズマやプラズマ近傍の標的材料から放出される飛散粒子が問題となる。飛散粒子の形状はイオン、原子やクラスター状の極めて小さく軽い粒子のものから、直径数 $\mu\text{m}$ ～数10 $\mu\text{m}$ 程度にまで及ぶ熔融された液滴状のものまで様々である。液滴状の大きく重たい飛散粒子は、X線光学素子に衝突すると光学素子を破損させてしまう。また、原子状の小さな飛散粒子はX線光学素子上に付着堆積し、次第にその性能（反射率や透過率）を低下させてしまう。

【0004】原子状の小さく軽い飛散粒子に対しては、真空容器内にバッファガスを封入し、X線光学素子の周囲をカバーで覆うことにより、光学素子上に付着・堆積する量を著しく低減できる（特開平7-127600号）が、質量の大きな液滴状の飛散粒子がX線光学素子に衝突することは、従来技術では阻止しきれなかった。すなわち、このような液滴状の飛散粒子に対しては機械的にシャッターで遮断するなどの方式が取られているが、液滴状飛散粒子の速度はその重さなどにより分布を持つため、完全には除去することができない。

【0005】また、このような粒径の大きな飛散粒子を除去するため、直径10cm程度の円盤状のターゲット材料を高速（40,000回転/分。円盤の接線方向の速度は約200m/sec）で回転させ、その円周近傍にレーザー光を照射することにより、レーザー照射点近傍から放出された飛散粒子の方向を、円盤の慣性力により回転方向に集中させる試みが行われていた（L. A. Shmaenok et al., Proceedings of the Conf. On Applications of Laser Plasma Radiation II, SPIE 2523, 12-14 July 1995）。

【0006】しかしながら、この方法では、円盤の大きさに限りがあるため、所定のショット数を照射した後はターゲットを交換しなくてはならないという問題点があった。ターゲットを交換するには、真空容器の真空状態を破らなくてはならないため、LPXを使用している装置の運転を中断する必要があり、効率を著しく低下させる。

【0007】また、ターゲット材料を常温で液体の物質（例えば、アルコールなど）として、ピエゾ素子で振動されているノズルから噴出させ、10 $\mu\text{m}$ 程度の微小液滴列を作り、この液滴にレーザー光を照射する方法も行われている。この方式は、①ターゲットの連続供給が容易にできる、②ターゲット材料の大きさが小さいため、レーザー光を照射された液滴すべてが瞬間的に蒸発するので、粒径の大きな飛散粒子が少ない、という特長があるが、①ノズル振動機構が複雑である、②液滴とレーザー光との同期をとることが難しく、安定してX線を発生させるににくい、という欠点がある。

【0008】液滴とレーザー光との同期をとることが困難であるという問題を解決するため、ノズル出口から液滴が生成されるまでの液柱部分にレーザーを照射する試みも行われているが(L. Malmqvist et al., Rev. Sci. Instrum. 67, 4150 (1996))、一般にこの液柱部分の長さはノズル出口から数mm程度しかない。このため、プラズマ生成位置とノズル先端までの距離が近くなり、プラズマから放出されたターゲット材料のイオンや原子などがノズルに衝突し、ノズル先端部を削り取る。そして、この削り取られた物質がX線光学素子上に付着し、素子の性能劣化を招いてしまう。

【0009】常温でガスであるキセノン(Xe)を冷却し、直径100 $\mu$ m程度のペレット状に固化させたものを、真空容器内に打ち出し、これにレーザー光を照射する試みも行われている。このとき、レーザー光の照射により、ペレットの一部は急激に加熱されて気化するが、大部分はプラズマの膨張による衝撃波により粉々に砕け、固体の小片として周囲に飛散していく。気化したキセノンガスは、光学素子上に付着しないので、素子の劣化に結びつくことはないが、固体上の小片が光学素子に衝突し、致命的なダメージを与えることがある。

【0010】また、常温で気体であるキセノン(Xe)をノズルから吹き出し、これにレーザー光を照射する試みも行われている。しかし、ターゲット材料に気体を使用しているため、物質密度が固体や液体の場合に比べて小さいことに加え、真空中に放出された気体は急激に周囲に拡散するため、ターゲット物質の密度はノズルからの距離が離れるに従い急激に減少する。このため、X線強度を上げようとすると密度の高いノズル近傍にレーザー光を集光する必要がある。すると、プラズマ生成位置とノズル先端の距離が短くなり、上述のようにノズルを削る結果となり、X線光学素子の性能を劣化させる。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】以上説明したように、従来の技術においては、ターゲット材料やノズルの飛散粒子がX線光学素子に衝突したり付着することを防止しながら、強度のX線を長期間に亘って発生させるLPXは実用化されていなかった。

【0012】本発明はこのような事情に鑑みてなされたもので、強度のX線を長期間に亘って発生させることができ、しかも、長時間に亘ってX線を発生し続けても、ターゲットからの飛散粒子によりX線光学素子の破損や劣化が発生しないLPXを提供することを課題とする。また、ノズルの構成を単純化し、かつ、ターゲットとレーザー光照射との同期のとりやすいLPXを提供することを課題とする。

【0013】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決するための第1の手段は、真空中に排気された容器の中に置かれた標的材料にレーザー光を照射することにより、当該標的

材料をプラズマ化し、当該プラズマよりX線を発生させるX線発生装置であって、前記標的材料の形態が液状であり、吐出口より連続的又は間欠的に吐出されることを特徴とするX線発生装置(請求項1)である。

【0014】本手段においては、標的材料を液体状とすることにより、標的物質の密度が気体よりも高く固体密度に近いため高密度のプラズマを生成でき、X線強度を高くすることができる。また、標的材料の補給が容易になり、長時間安定して連続的にLPXを使用することができる。さらに、本手段においては、液状標的を連続的あるいは間欠的に噴出するため、従来の液滴状標的に比べて、標的とレーザー照射の同期が取りやすく、的確に標的に照射することができる。加えて、本手段においては、吐出口とレーザー光照射位置を離すことができるため、プラズマから放出されたイオンや原子などにより吐出口やその周辺部材が削られ、これらが飛散粒子となり光学素子上に付着・堆積して光学素子の性能を劣化させることが少ない。なお、標的材料は常温で液状であってもよいし、加熱・冷却することにより液状となる物であってもよい。

【0015】ここにおいて、「間欠的」とは、レーザーの照射時間に対応する程度の時間のみ液状標的が噴出されている程度の断続性を示す。これに対し、従来の液列は、レーザーの照射間隔より遙かに短い間隔で液列が放出されており、本手段における「間欠的に」放出されていることにはならない。間欠的に標的物質を吐出する方法としては、たとえば、電磁バルブの開閉により、吐出を制御する方法がある。この場合、レーザーの照射直前に電磁バルブを開とし、レーザー照射終了後に電磁バルブを閉とすればよい。

【0016】標的材料として、蒸気圧の高い物質が使用される場合、連続的に標的材料を吐出すると、レーザーを照射されない標的物質すなわち無駄に吐出されている標的物質が蒸発し、真空容器内の圧力が上がってしまって好ましくない。よって、このような場合には、標的物質を間欠的に吐出することが特に重要である。

【0017】前記課題を解決するための第2の手段は、真空中に排気された容器の中に置かれた標的材料にレーザー光を照射することにより、当該標的材料をプラズマ化し、当該プラズマよりX線を発生させるX線発生装置であって、前記標的材料の形態が粉末状であり、この粉末状の標的材料が溶液中に拡散され、当該混濁液が吐出口より連続的又は間欠的に吐出されることを特徴とするX線発生装置(請求項2)である。

【0018】本手段は、形状をテープ状とできないような標的材料に対して好適である。標的材料を連続的に使用する最も簡単な方法は、標的物質の形状をテープ状とすることである。テープ状の標的材料を巻取りながらレーザー光を照射すれば、長時間X線を発生させ続けることができる。また、テープ状とすることにより、標的材

料の厚さが薄くなる(たとえば数 $\mu\text{m}$ ~数十 $\mu\text{m}$ )ので、飛散粒子の大部分が標的裏面方向に突抜けてしまうため、標的表面方向(レーザー光照射方向)へ放射される飛散粒子量を減らすことができるというメリットもある。

【0019】しかしながら、標的材料の種類によっては、テープ状に形成することが困難な物もある。たとえば窒化ホウ素( $\text{BN}$ )や、 $\text{B}_4\text{C}$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{ZrO}_2$ 等のセラミックスや $\text{SiO}_2$ 等がこのような標的材料である。しかし、このような材料を粉末状にすることは容易である。よって、これらの材料を粉末化し、粉末状の標的部材を溶液中に拡散(混合)し、この混濁液を吐出口より連続的又は間欠的に吐出させて、この液柱にレーザー光を照射すれば、粉末状の標的材料をプラズマ化でき、標的材料からのX線を利用することができる。

【0020】溶液としては、水、アルコール、オイル等の有機物の液体、アンモニア等の無機物の液体など、液相のものであればどのようなものでも適宜選択して使用できる。また、粉末状の標的部材の大きさは、吐出口よりも小さければよく、おおむね数十 $\text{nm}$ ~数十 $\mu\text{m}$ 程度であることが好ましい。

【0021】レーザー光の照射により、溶液もプラズマ化するため、溶液物質からもX線が放出されるが、これらのX線は、フィルターや多層膜ミラーを用いることにより、容易に取除くことができる。たとえば、溶液として有機系の拡散ポンプオイル(アルキル系オイル)を用い、粉末状の標的材料として $\text{BN}$ を用いて、 $\text{B}$ イオンから放出されるライマン $\alpha$ 線(波長 $4.8\text{nm}$ )を利用する場合を考える。この $\text{BN}$ 混濁液にレーザー光を照射すると、溶液である拡散ポンプオイルより、 $\text{C}$ 、 $\text{O}$ 、 $\text{N}$ 等のイオンからのX線が、 $\text{BN}$ より、 $\text{B}$ 及び $\text{N}$ イオンからのX線が放出される。このとき、X線フィルターとして炭素の薄膜(たとえば厚さ $2\mu\text{m}$ )を用いると、炭素のK吸収端である波長 $4.5\text{nm}$ より短波長のX線は大きく減衰し、吸収端より長波長のX線のみが透過する。 $\text{C}$ 、 $\text{O}$ 、 $\text{N}$ 等のイオンからのX線は、いずれも $4.5\text{nm}$ より短波長なので、炭素フィルターによりカットされ、結果的に $\text{B}$ のライマン $\alpha$ 線を取り出すことができる。本手段においても、「間欠的」という意味は、前記第1の手段と同じである。

【0022】前記課題を解決するための第3の手段は、前記第1の手段又は第2の手段であって、標的材料の噴出速度が少なくとも $50\text{m/sec}$ 以上であることを特徴とするもの(請求項3)である。

【0023】粒径の大きな飛散粒子の放出速度は、レーザー光照射条件や標的材料にもよるが、 $102\sim 103\text{m/sec}$ 程度であるため、液状標的の噴出速度を $50\text{m/sec}$ 以上とすれば、飛散粒子の放出方向は液状標的の下流側に向きを変えることになる。従って、液状標的上流側では液滴状の飛散粒子は減少するので、この位置にX線光学素

子を配置すればこれら飛散粒子による光学素子への損傷を低減することができる。

【0024】前記課題を解決するための第4の手段は、前記第1の手段から第3の手段のいずれかであって、液状標的又は混濁液が、溶解された液相の金属であることを特徴とするもの(請求項4)である。

【0025】本手段においては、液状標的又は混濁液として、例えば、亜鉛や鉛、錫のように常温では固体であり、加熱することにより液状となるものを使用する。亜鉛であれば $419.58^\circ\text{C}$ 以上、鉛であれば $327.5^\circ\text{C}$ 以上、錫であれば $231.97^\circ\text{C}$ 以上に加熱すると液体状にすることができる。このようにすることにより、これらの標的材料を(たとえば円盤状の)固体として用いたときよりも、長時間使用できるようになる。

【0026】前記課題を解決するための第5の手段は、前記第4の手段であって、熔融された液相の金属が、錫( $\text{Sn}$ )あるいは鉛( $\text{Pb}$ )を含む材料であることを特徴とするもの(請求項5)である。

【0027】錫( $\text{Sn}$ )は波長 $13\text{nm}$ 付近にスペクトルのピークがあるため、錫を含む物質は $13\text{nm}$ の波長を用いる軟X線縮小リソグラフィー用のX線源の標的材料に適している。また、錫は融点が比較的低く( $231.97^\circ\text{C}$ )容易に液体状にすることができる。また、飽和蒸気圧が低いいため真空中でも蒸発しにくいので、光学素子上に付着・堆積することもない。例えば液体状となっている $560^\circ\text{C}$ 付近であっても、その飽和蒸気圧は約 $10^{-11}\text{Torr}$ 程度であり、 $\text{LPX}$ として使用される典型的な真空度(数 $\text{Torr}\sim 10^{-6}\text{Torr}$ )に比べて十分低い。

【0028】また、本手段においては、熔融された液相の金属材料は、錫を含む合金や化合物であってもよい。例えば、ハンダは錫と鉛の合金であるが、その融点は $\text{Sn}$  60%、 $\text{Pb}$  40%の場合、 $183^\circ\text{C}$ と純粋の錫の場合よりも低く、液状にしやすい。また、錫と同様に、鉛の蒸気圧も約 $260^\circ\text{C}$ においても $10^{-11}\text{Torr}$ と非常に低いため光学素子上に付着・堆積することがない。

【0029】前記課題を解決するための第6の手段は、前記第1の手段から第3の手段のいずれかであって、液状標的又は混濁液が、冷却された液化ガスであることを特徴とするもの(請求項6)である。

【0030】たとえば、 $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{Kr}$ 、 $\text{Xe}$ などは常温では気体であるが、冷却することにより液状にすることができる。 $\text{N}_2$ の場合には $-209.86^\circ\text{C}\sim -195.8^\circ\text{C}$ の間であれば液状となり、 $\text{CO}_2$ の場合には $-56.6^\circ\text{C}\sim -78.5^\circ\text{C}$ 、 $\text{Kr}$ の場合には $-156.6^\circ\text{C}\sim -153.4^\circ\text{C}$ 、 $\text{Xe}$ の場合には $-111.9^\circ\text{C}\sim -108.1^\circ\text{C}$ であれば液体となる。このような液体状の標的材料を用いると、前例に示した冷却して固体のペレット状にしたときに問題となる破片が生ぜず、光学素子に損傷を与えない。

【0031】前記課題を解決するための第7の手段は、前記第6の手段であって、冷却された液化ガスが、希ガ

ス又は希ガスを含むガスであることを特徴とするもの（請求項7）である。

【0032】液化ガスとして希ガス（Ne、Ar、Kr、Xe、Rn）などを用いれば、レーザー照射された部分は気化し、光学素子に使われている物質とも化学反応しないので、光学素子上に付着・堆積することがない。

【0033】前記課題を解決するための第8の手段は、前記第1の手段から第7の手段のいずれかであって、標的材料として使用される液相の物質又は混濁液を循環使用するための循環機構を具備したことを特徴とするもの（請求項8）である。

【0034】標的材料や、粉末の標的材料を含む混濁液を循環して使用するようになれば、標的材料や混濁液を外部から供給する必要がないので連続的に使用することができ、装置の使用効率を大幅に上げることができる。特に標的材料や混濁液が高価な場合には、装置のランニングコストを削減することができる。標的材料や混濁液の循環は液相のまま行ってもよいし、途中で固体あるいは気体にして循環するようにしてもよい。途中で固体あるいは気体にして循環するようにすると、常温で固体あるいは気体の物質を使用する場合に都合がよい。たとえば錫などのように加熱して液状にしている場合には、液状のまま循環させようとする、配管系を高温に維持すると共に、循環ポンプなどすべてを高温仕様ものにする必要がある、構成が複雑になりコストアップにもつながる。このような場合には、一度固体にもどしてから輸送し、標的として使用する前に加熱して溶融するようになれば、循環系は単純になり、信頼性が上がると共にコストも下げることができる。

【0035】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態の例を図を用いて説明する。図1は、本発明の第1の実施の形態を示す概略図である。図1において、100は液化標的溜まり、101は標的材料、102は配管、103はノズル、104はXステージ、105はYステージ、106はZステージ、107は可変アパーチャー、108はXステージ、109はYステージ、110はパイプ、111は容器、112はバルブ、113は容器、114、115、116はバルブ、117はレンズ、118は窓、119は真空容器、120はレーザー光、121はリークバルブ、122は標的材料の液柱である。

【0036】液化標的溜まり100内には液体状の標的材料101が入れている。ここでは標的材料として水（ $H_2O$ ）が用いられている。液化標的溜まり100は加圧装置（この場合には高圧空気ポンプ）に接続されており、標的材料101は、数気圧～100気圧程度の圧力で圧縮されている。これにより標的材料101は配管102を通り、フィードスルーを通過した後、ノズル103より噴出する。ノズル103から噴出されてできた標的材料の液柱122にレーザー光を照射しプラズマ

を生成してX線を発生させる。

【0037】フィードスルーはXステージ104、Yステージ105、Zステージ106に取り付けられており、ノズル103の位置を調整し、所定の位置にプラズマを生成できるようにしている。標的材料は可変アパーチャー107及びパイプ110を通過した後、容器111内に蓄積される。容器111内は真空排気装置（図示せず）により、標的材料の飽和蒸気圧程度まで減圧されている。可変アパーチャー107はXステージ108及びYステージ109に取り付けられている。

【0038】始め、可変アパーチャー107の開口は最大に開かれており、ノズル103の位置が決定した後、Xステージ108及びYステージ109により可変アパーチャーの中心に標的材料が通過するようにし、可変アパーチャーの開口の径を標的材料の液柱122の径よりもわずかに大きくなるまで徐々に絞る。このようにすることにより、真空容器119と容器111との間で差動排気が行えるようになる。

【0039】容器111内に標的材料が所定の量だけ蓄積されてきたら、バルブ115を徐々に開け、容器113内を排気する。このとき、バルブ112、114、116は閉じられている。容器113内の圧力が容器111と同じになったときバルブ112を開けて容器111内に溜まった標的材料を容器113へ流入させる。その後、バルブ112及び115を閉じ、バルブ116を徐々に開け、容器113と液化標的溜まり100内の圧力が同じになったときにバルブ114を開けて容器113内の標的材料を液化標的溜まり100へ流入させる。標的材料がすべて移動し終わったら、バルブ116、114を閉じ、リークバルブ121を開けて容器113内の圧力を大気圧まで減圧したのち、リークバルブ121を閉じる。以上のようにすることにより、標的材料のレーザー光照射位置への供給を中断することなく、連続的に標的材料を循環させることができる。

【0040】ここで標的材料として使用している水は比較的飽和蒸気圧が高いのでプラズマから発生したX線が真空容器内の蒸気により吸収され、減衰してしまう可能性がある。そのため、できるだけ飽和蒸気圧が低くなるように標的材料を冷却している。液化標的溜まり100、配管102、ノズル103、容器111は冷却装置により約1℃に冷却されている。1℃の水の飽和蒸気圧は約5Torrである。標的材料を冷却することにより容器111内の圧力は5Torr程度まで、真空容器119内の圧力は5Torrあるいは、容器111との差動排気ができる場合にはそれ以下の圧力まで減圧することができる。

【0041】真空容器119内の圧力をさらに下げたい場合には標的材料の液柱122部を、レーザー光入射用、レーザー光出射用及びX線取り出し用の開口を設けた部材で覆えば良い。レーザー光出射用の開口はノズル

位置調整時に標的材料に当たらなかったレーザー光が部材に当たるのを防ぐために設けられており、これは必要がなければ無くてもよい。

【0042】図2(a)、(b)にこの実施の形態のノズル近傍の様子の例を示す。図2において、123は透過レーザー光、124a、124bは部材、125はレーザー光入射開口、126はX線取り出し開口、127はレーザー出射開口であり、その他の符号は、図1と同じ物を示す。

【0043】レーザー光入射開口125、X線取り出し開口126及びレーザー出射開口127を設けた部材124aで液柱122の周りを覆っている。ノズル103と部材124aの間は密着しており、部材124aと可変アパーチャー107の間は極僅かな隙間があいており、可変アパーチャーの位置をX、Yステージ108、109(図1)により変化できるようになっている。このようにすれば液柱122部から真空容器119内へ蒸発する量を低減できるので、真空容器119内の圧力を低下させることができる。もし、必要であれば、部材124a内を排気装置により排気するようにしてもよい。

【0044】図2(b)に示す例においては、図2(a)と同様に液柱122の周囲を部材124bで覆っており、部材124bの内部を排気(排気装置は図示していない)できるようになっている。

【0045】これらの実施の形態でノズル103の開口の径が200 $\mu$ m、背圧35気圧のとき、標的材料の流速は約64m/secが得られる。また、ノズル開口径が100 $\mu$ m、背圧が100気圧の場合には、標的材料の流速は約150m/secとなる。このようにすると標的物質の流速は50m/secを越えるので、先に述べたように慣性力により粒径の大きな飛散粒子の飛び出し方向を下流側に変えることができる。

【0046】また、上述の実施の形態では液体の状態での回収し、循環させているが、以下の実施の形態で述べるように、一旦、固体あるは気体の状態にして回収、循環させてもよい。上述の実施の形態では標的物質として水を用いているが、これに限るものではない。水は常温で液体であるが、例えば錫やクリプトンなどのように、加熱あるいは冷却することにより液体となる物質であってもよい。加熱することにより液体となる物質の場合には容器、配管ノズル、容器、容器を液化する温度に加熱しておけばよい。また、冷却して液化する物質の場合には容器、配管ノズル、容器、容器を液化する温度に冷却しておけばよい。

【0047】本実施の形態においては、標的材料に比較的蒸気圧の高い水を用いているが、常温で蒸気圧の低い物質を用いれば、上述のように差動排気系を使用しなくてもよいので、装置の構成がより簡単になる。このような材料として、拡散ポンプ用のオイルや、ロータリーポンプ用のオイル等がある。

【0048】本発明の第2の実施の形態の概略を図3に示す。図3において、300は液化標的溜まり、301は標的材料、302は配管、303はノズル、304はXステージ、305はYステージ、306はZステージ、307はパイプ、308はモータ、309はプロペラ、310は螺旋状フィン、311は容器、312はバルブ、313は容器、314、315、316はバルブ、317はレンズ、318は窓、319は真空容器、320はレーザー光、321はリークバルブ、322は標的材料の液柱である。

【0049】本実施の形態では、標的材料としてSnが用いられている。第1の実施の形態においては、加熱あるいは冷却して液体となる物質であっても液体の状態のまま循環させていたが、本実施の形態では一度固体にしてから循環させている。このようにすることにより、加熱あるいは冷却する部分が少なくなるため、装置構成が容易になる。本実施の形態では、装置構成は図1に示した第1の実施の形態とほぼ同じなので、異なるところのみを詳しく説明する。

【0050】液化標的溜まり300の中に標的材料301であるSnが入れられており、液化標的溜まり300はSnが液化する温度まで加熱されている(例えば300 $^{\circ}$ C)。配管302及びノズル303も同様にSnが液化する温度まで加熱されている。液化したSnは圧縮窒素により加圧され、配管302を通りノズル303より液体のまま噴出される。真空容器319内に噴出されたSnの液柱322にレーザー光320が照射されX線が輻射される。

【0051】液状のSnはパイプ307を通り容器311内に入るが、モーター308により回転しているプロペラ309に当たることにより飛び散り、容器311の内壁や、容器内311に取り付けられている螺旋状のフィン310に衝突する。容器311及びフィン310は冷却水などによりSnの融点よりも十分に低温(例えば10 $^{\circ}$ C)に冷却されているので、容器311内壁やフィン310に衝突したSnの液滴はすぐさま冷却され、固体の粒子となる。この固体の粒子はフィン310の上を転がりながら落下し、容器311の底に溜まる。Snの粒子が所定の量だけ溜まったならば、バルブ315を開けて容器313内を排気し、真空容器319とほぼ同じ圧力になるようにする。その後、バルブ312を開けて容器311に溜まっていたSnの粒子を容器313内に落下させる。

【0052】その後、バルブ312、315を閉め、バルブ316を徐々に開けて容器313と液化標的溜まり300内の圧力を同じにした後、バルブ314を開けてSnの粒子を容器313から液化標的溜まり300へ落下させる。Snがすべて移動し終わったら、バルブ314、316を閉じ、リークバルブ321を開けて容器313内の圧力を大気圧まで減圧した後、リークバルブ321



を閉じる。液化標的溜まり300内に落下したSn粒子は加熱されて液体状になり、再びノズル303より噴出される。

【0053】先に述べたように300℃程度の液体のSnは飽和蒸気圧が低く、また、容器311内には固体のSnが貯蔵されるため液体のSnに比べて蒸気圧はさらに低くなる。このため、第1の実施の形態のように真空容器319と容器311の間にアパーチャーを入れて差動排気する必要がないので、装置の構成がより単純になる。

【0054】図4に本発明の第3の実施の形態の概要を示す。図4において、400は液化標的溜まり、401は標的材料、403はノズル、404はXステージ、405はYステージ、406はZステージ、407はパイプ、408はモータ、409はプロペラ、410は螺旋状フィン、411は容器、412はバルブ、413は容器、414、415はバルブ、416はリークバルブ、417はベルトコンベア、418は受け皿、419、420、421はバルブ、422はリークバルブ、423はレンズ、424は窓、425はレーザー光、426は標的材料の液柱、427は真空容器、428は容器である。

【0055】図3に示す第2の実施の形態では、固化した標的材料を落下させることにより液化標的材料溜まり300へ移動させていたが、本実施の形態では、ベルトコンベア417により液化標的溜まり400へ運搬している。このようにすることにより、液化標的溜まり300をノズル403の近傍に配置できるので、第2の実施の形態のように液化標的溜まりからノズルまでの長い配管を加熱しなくてもよくなる。

【0056】本実施の形態では、第2の実施の形態と同様に、標的材料としてSnを用いている。Snは300℃程度に加熱され、液化した状態で液化標的溜まり400に蓄えられている。液化したSn401は圧縮窒素により加圧され、同じく300℃程度に加熱されているノズル403より液体のまま噴出される。真空容器427内に噴出されたSnの液柱426にレーザー光425が照射されX線が輻射される。液状のSnはパイプ407を通り容器411内に入り、第2の実施の形態と同様に固化され、Snの粒子として容器411内に蓄積される。

【0057】所定の量のSn粒子が蓄積されたら、バルブ414を開けて容器413内を真空容器427内と同程度の圧力まで排気し、その後バルブ412を開けてSnの粒子を容器413に落下させる。

【0058】その後、バルブ412、414を閉め、リークバルブ416を開けて容器413内を大気圧に戻した後、バルブ415を開けて容器413内にあるSn粒子をベルトコンベア417に移す。Sn粒子はベルトコンベア417により受け皿418に移される。受け皿418にある程度溜まったら、バルブ419を開けてSn粒子を容器428内に流し込む。(このとき、容器428

内は大気圧になっている。)

その後、バルブ419を締めて、バルブ421を徐々に開け容器428と液化標的溜まり400内の圧力が同じになるようにする。そして、バルブ420を開けてSn粒子を液化標的溜まり400に落下させて液化し、再び標的材料として用いる。

【0059】このようにすると液化標的溜まり400を真空容器427の近くに置くことができ、液化標的溜まり400と真空容器427のフィードスルーまでの配管の長さを短くすることができる。このため、加熱しなくてはならない部材を近くにまとめることができるので、装置の構成が容易になる。

【0060】本実施の形態では、大気中に置かれたベルトコンベア417により固化した標的材料を輸送しているが、この輸送は真空中で行ってもよい。第2、第3の実施の形態では標的材料としてSnを用いていたが、これに限らずどのような物質であってもよく、SnやZn等の単一の元素であってもよいし、ハンダなどの合金や化合物であってもよい。第2、第3の実施の形態では加熱することにより液体となる標的物質を用いていたが、冷却することにより液体となる物質であってもよい。

【0061】図5に本発明の第4の実施の形態の概要を示す。図5において、500は液化標的溜まり、501は標的材料、502は配管、503はノズル、504はXステージ、505はYステージ、506はZステージ、507はパイプ、508はモータ、509はプロペラ、510は螺旋状フィン、511は容器、512はバルブ、513は容器、514、515、516はバルブ、517はレンズ、518は窓、519は真空容器、520はレーザー光、521はリークバルブ、522は標的材料の液柱である。

【0062】本実施の形態では、標的材料としてKr(クリプトン)を用いている。液化標的溜まり500にはKrが導入されている。液化標的溜まり500は冷却装置(不図示)により、Krが液化する-156.6℃〜-153.4℃になるように制御され、Krは液体の状態で液化標的溜まり500内に貯蔵されている。配管502及びノズル503も同様にKrが液化する温度まで冷却されている。液化したKrは圧縮窒素により加圧され、配管502を通りノズル503より液体のまま噴出される。真空容器519内に噴出されたKrの液柱522にレーザー光520が照射され、X線が輻射される。

【0063】液状のKrはパイプ507を通り容器511内に入るが、モーター508により回転しているプロペラ509に当たることにより飛び散り容器511の内壁や容器内に取り付けられている螺旋状のフィン510に衝突する。容器511及びフィン510は液体窒素などによりKrの融点よりも十分に低温(例えば-209℃)に冷却されているので、容器511内壁やフィン510に衝突したKrの液滴はすぐさま冷却され、固体の粒子とな

る。

【0064】この固体の粒子はフィンの上を転がりながら落下し、容器511の底に溜まる。Krの粒子が所定の量だけ溜まったならば、バルブ515を開けて容器513内を排気し、真空容器519とほぼ同じ圧力になるようにする。その後、バルブ512を開けて容器511に溜まっていたKrの粒子を容器513内に落下させる。容器513も容器511同様に液体窒素などによりKrの融点よりも十分に低温（例えば-209℃）に冷却されている。

【0065】その後、バルブ512、515を閉め、バルブ516を徐々に開けて容器513と液化標的溜まり500内の圧力を同じにした後、バルブ514を開けてKrの粒子を容器513から液化標的溜まり500へ落下させる。Krがすべて移動し終わったら、バルブ514、516を閉じ、リークバルブ521を開けて容器513内の圧力を大気圧程度まで減圧したのち、リークバルブ521を閉じる。液化標的溜まり500内に落下したKr粒子は液体状になり、再びノズル503より噴出される。

【0066】もし、容器511あるいは容器513内で貯蔵されているKr粒子が互にくっつきあい、大きな固まりとなってしまった場合には何らかの攪拌、粉碎機構により粒子状あるいは粒塊状にしてから、次段の容器への移動を行えばよい。第4の実施の形態では、回収した標的材料(Kr)を固化した状態で液化標的溜まり500へ循環させているが、気体の状態で循環させてもよい。

【0067】図6に、本発明の第5の実施の形態の概要を示す。図6において、600は液化標的溜まり、601は標的材料、602は配管、603はノズル、604はXステージ、605はYステージ、606はZステージ、607はパイプ、608はモータ、609はプロペラ、610は螺旋状フィン、611は容器、612はバルブ、613は容器、614、615はバルブ、616は真空容器、617はレーザー光、618はレンズ、619は窓、622は標的材料の液柱である。

【0068】本実施の形態においても、標的材料としてKr(クリプトン)を用いている。液化標的溜まり600にはKrが導入されている。液化標的溜まり600は冷却装置(不図示)により、Krが液化する-156.6℃~-153.4℃になるように制御され、Krは液体の状態で液化標的溜まり内に貯蔵されている。ノズル603も同様にKrが液化する温度まで冷却されている。液化したKrは圧縮窒素により加圧され、ノズル603より液体のまま噴出される。真空容器616内に噴出されたKrの液柱622にレーザー光617が照射されX線が輻射される。液状のKrはパイプ607を通り容器611内に入るが、モーター608により回転しているプロペラ609に当たることにより飛び散り、容器611の内壁や容器内に取り付けられている螺旋状のフィン610に衝突する。

【0069】容器611及びフィン610は液体窒素などによりKrの融点よりも十分に低温（例えば-209℃）に冷却されているので、容器611内壁やフィン610に衝突したKrの液滴はすぐさま冷却され、固体の粒子となる。この固体の粒子はフィンの上を転がりながら落下し、容器の底に溜まる。

【0070】Krの粒子が所定の量だけ溜まったならば、バルブ614を開けて容器613内を排気し、真空容器616とほぼ同じ圧力になるようにする。その後、バルブ612を開けて容器611に溜まっていたKrの粒子を容器613内に落下させる。そして、バルブ612、614を閉めた後、容器613を加熱し容器613に貯まっている固体Krの粒子を気化させる。

【0071】気体となったKrの圧力が液化標的溜まり600内を加圧している窒素ガスの圧力よりも高くなったら、バルブ615を徐々に開け、気化したKrを液化標的溜まり600内に流入させる。流入したKrガスは再び冷却されて液体となり、ノズルより噴出される。

【0072】もし、加圧している窒素ガスの圧力が非常に高く（例えば数10気圧~100気圧程度）、気化したKrを窒素ガスの圧力よりも高くすることが難しい場合には、気化したKrを液化あるいは固体化させるための容器を用意し、一旦、液体または固体にしてから液化標的溜まり600内に導入すればよい。

【0073】容器611（あるいは、もし必要なら気化したKrガスを固体化する容器）内で貯蔵されているKr粒子が互にくっつきあい、大きな固まりとなってしまった場合には何らかの攪拌、粉碎機構により粒子状あるいは粒塊状にしてから、次段の容器への移動を行えばよい。

【0074】なお、この実施の形態では、圧縮窒素により液化Krを加圧してノズルより噴出させているが、気化したKrを用いて液化Krを加圧して噴出させてもよい。このように、気化した状態で循環させれば液化標的溜まりとノズルの距離を近づけられる。このため、液化温度に制御する部材が液化標的溜まりとノズルとその間の短い配管だけとなり、第4の実施の形態のように液化標的溜まりとノズルをつなぐ長い配管を液化温度に制御する必要がないので、装置構成が簡単となる。

【0075】第4、第5の実施の形態においては、標的材料としてKrを用いたが、Krに限らず、常温で気体であり、冷却することにより液体となる物質であればXeやCO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>などどんなものでもよい。

【0076】上述の実施の形態では、液相の標的材料を用いていたが、粉末状の標的材料を溶液中に混ぜ、混濁液としてノズルから噴出させてもよい。この場合、溶液は常温で液体であってもよいし、加熱又は冷却することにより液相となるものであってもよい。また、粉末状の標的材料としては、BN、B<sub>4</sub>C、SiC、ZrO<sub>2</sub>等のセラミックスや、SiO<sub>2</sub>、又はFe、Cu、Al、S



n等の金属粒子、ラテックス等の有機微粒子等のようなものであってもよい。

【0077】以上の各実施の形態においては、レーザー光の標的材料位置での集光径は任意であるが、標的材料の液柱部の径と同程度あるいはそれよりも大きくすると、標的材料の液柱の同径方向にアブレーションが起こるため、流れに対して直角方向に粒径の大きな飛散粒子が放出されることがなくなるので好ましい。また、以上の各実施の形態では、標的材料を連続的にノズルから噴出させていたが、間欠的に噴出させてもよい。これはレーザーの発光の繰り返し周波数が低い場合（たとえば数10Hz以下）に適している。また、以上の各実施の形態では、標的材料の加圧装置として高圧ガスが用いられているが、加圧装置は任意でよく、コンプレッサーやポンプ（例えばギヤーポンプ）などで加圧してもよい。

【0078】

【発明の効果】以上説明したように、本発明のうち請求項1に係る発明においては、標的材料の形態が液状であり、吐出口より連続的又は間欠的に吐出されるので、標的物質の密度が気体よりも高く固体密度に近いため高密度のプラズマを生成でき、X線強度を高くすることができる。また、標的材料の補給が容易になり、長時間安定して連続的にLPXを使用することができる。さらに、液状標的を連続的あるいは間欠的に噴出するため、標的とレーザー照射の同期が取りやすく、的確に標的に照射することができる。加えて、吐出口とレーザー光照射位置を離すことができるため、プラズマから放出されたイオンや原子などにより吐出口やその周辺部材が削られ、これらが飛散粒子となり光学素子上に付着・堆積して光学素子の性能を劣化させることが少ない。

【0079】請求項2に係る発明においては、テープ状に加工することができない物質も、粉末状として溶液中に混ぜ、この混濁液にレーザー光を照射することにより、連続して長時間X線を発生させることが可能となる。

【0080】請求項3に係る発明においては、標的材料又は混濁液の噴出速度が少なくとも50m/sec以上であるので、液状標的上流側では液滴状の飛散粒子は減少する。よって、この位置にX線光学素子を配置すればこれら飛散粒子による光学素子への損傷を低減することができる。

【0081】請求項4に係る発明においては、溶解された液相の金属を標的部材として用いることにより、これらを固体として用いるときよりも、長時間に亘って連続してX線を発生させることができる。

【0082】請求項5に係る発明においては、熔融された液相の金属材料が、錫(Sn)あるいは鉛(Pb)を含む材料であるので、13nmの波長を用いる軟X線縮小リソグラフィ用のX線源の標的材料に適している。また、鉛は融点が比較的強く容易に液体状にすることができ、ま

た、飽和蒸気圧が低いため真空中でも蒸発しにくいので光学素子上に付着・堆積することがない。

【0083】請求項6に係る発明においては、液状標的又は混濁液が、冷却された液化ガスであるので、冷却して固体のペレット状にしたときに問題となる破片が生ぜず、光学素子に損傷を与えない。

【0084】請求項7に係る発明においては、冷却された液化ガスが、希ガス又は希ガスを含むガスであるので、レーザー照射された部分は気化し、光学素子に使われている物質とも化学反応しない。よって、光学素子上に付着・堆積することがない。

【0085】請求項8に係る発明においては、標的材料として使用される液相の物質又は混濁液を循環使用するための循環機構を具備しているため、標的材料を外部から供給する必要がなく、連続的に使用することができ、装置の使用効率を大幅に上げることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施の形態の概略を示す図である。

【図2】図1に示した実施の形態のノズル付近の構造を示す図である。

【図3】本発明の第2の実施の形態の概略を示す図である。

【図4】本発明の第3の実施の形態の概略を示す図である。

【図5】本発明の第4の実施の形態の概略を示す図である。

【図6】本発明の第5の実施の形態の概略を示す図である。

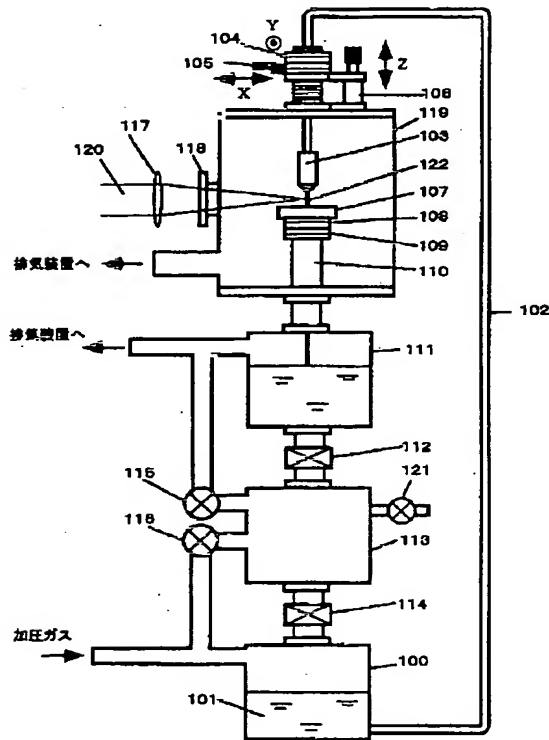
【符号の説明】

100…液化標的溜まり、101…標的材料、102…配管、103…ノズル、104…Xステージ、105…Yステージ、106…Zステージ、107…可変アパーチャー、108…Xステージ、109…Yステージ、110…パイプ、111…容器、112…バルブ、113…容器、114、115、116…バルブ、117…レンズ、118…窓、119…真空容器、120…レーザー光、121…リークバルブ、122…標的材料の液柱、123…透過レーザー光、124a、124b…部材、125…レーザー光入射開口、126…X線取り出し開口、127…レーザー出射開口、300…液化標的溜まり、301…標的材料、302…配管、303…ノズル、304…Xステージ、305…Yステージ、306…Zステージ、307…パイプ、308…モータ、309…プロベラ、310…螺旋状フィン、311…容器、312…バルブ、313…容器、314、315、316…バルブ、317…レンズ、318…窓、319…真空容器、320…レーザー光、321…リークバルブ、322…標的材料の液柱、400…液化標的溜まり、401…標的材料、403…ノズル、404…Xス

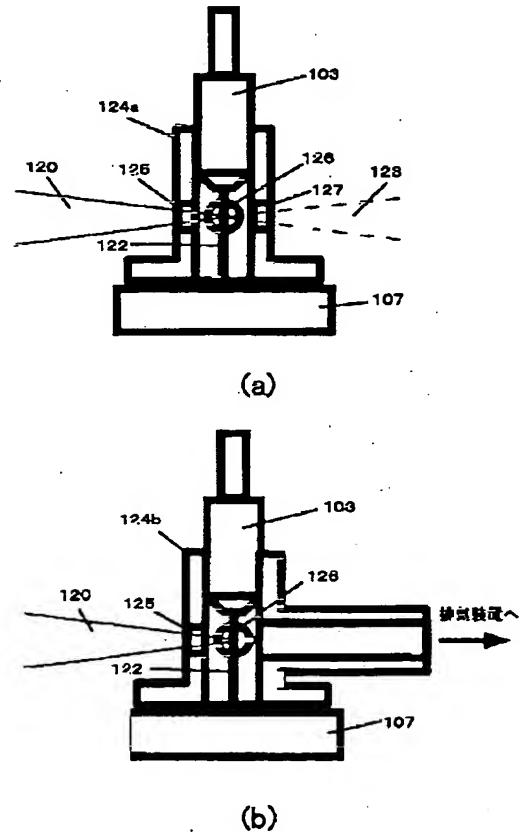
テージ、405…Yステージ、406…Zステージ、407…パイプ、408…モータ、409…プロペラ、410…螺旋状フィン、411…容器、412…バルブ、413…容器、414、415…バルブ、416…リークバルブ、417…ベルトコンベア、418…受け皿、419、420、421…バルブ、422…リークバルブ、423…レンズ、424…窓、425…レーザー光、426…標的材料の液柱、427…真空容器、428…容器、500…液化標的溜まり、501…標的材料、502…配管、503…ノズル、504…Xステージ、505…Yステージ、506…Zステージ、507…パイプ、508…モータ、509…プロペラ、510

…螺旋状フィン、511…容器、512…バルブ、513…容器、514、515、516…バルブ、517…レンズ、518…窓、519…真空容器、520…レーザー光、521…リークバルブ、522…標的材料の液柱、600…液化標的溜まり、601…標的材料、602…配管、603…ノズル、604…Xステージ、605…Yステージ、606…Zステージ、607…パイプ、608…モータ、609…プロペラ、610…螺旋状フィン、611…容器、612…バルブ、613…容器、614、615…バルブ、616…真空容器、617…レーザー光、618…レンズ、619…窓、622…標的材料の液柱

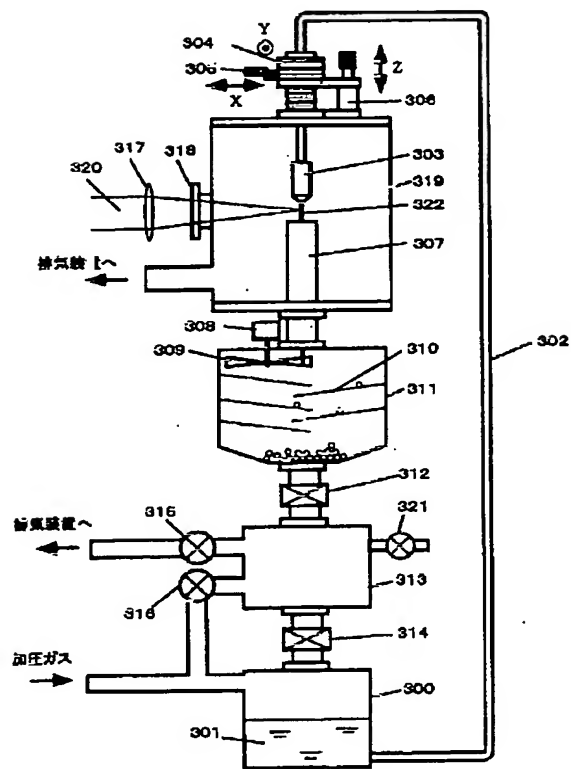
【図1】



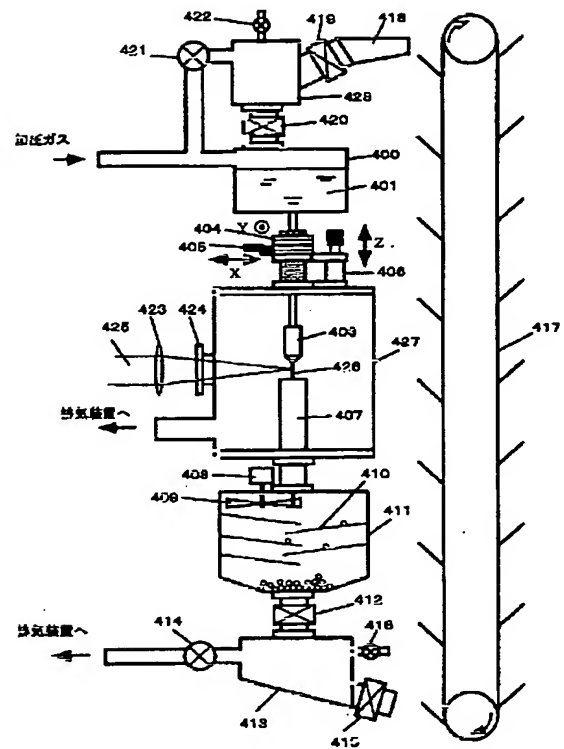
【図2】



【図3】



【図4】



【図5】

